

Кабалдин Ю. Г., Саблин П. А.
Yu. G. Kabaldin, P. A. Sablin

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ РЕЗАНИИ**

**INFLUENCE OF MACHINED MATERIAL STRUCTURE ON THE FORMATION
OF SURFACE LAYER AND QUALITY OF MACHINED SURFACE DURING CUTTING**

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород).

Yuriy G. Kabaldin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod).

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Аннотация. Показано, что шероховатость поверхностного слоя стальных заготовок зависит от степени деформации и размера зерна основной структурной составляющей сталей, в частности феррита и аустенита. Параметры R_a и R_z по размерам меньше зёрен упрочняющих фаз (частиц) в феррите и аустените и не могут определять высоту неровностей поверхностного слоя.

Summary. It is shown that the roughness of the surface layer of steel billets depends on the degree of deformation and grain size of the main structural component of steels, in particular, ferrite and austenite. The parameters R_a and R_z are smaller than the grains of the hardening phases (particles) in ferrite and austenite and cannot determine the height of the surface layer irregularities.

Ключевые слова: резание, поверхностный слой, структурные элементы материалов, параметры R_a и R_z , цифровой двойник шероховатости.

Key words: cutting, surface layer, structural elements of materials, parameters R_a and R_z , digital roughness double.

УДК 621.9

Вопросам влияния условий резания на механизм формирования поверхностного слоя и шероховатость обработанной поверхности посвящено большое количество работ [1–9] как отечественных, так и зарубежных исследователей. Работы учёных были направлены на установление зависимостей параметров шероховатости R_a и R_z от режимов резания и их влияния на эксплуатационные свойства деталей машин.

Структурное состояние материала при прочих равных условиях зачастую может оказаться наиболее важным фактором, влияющим на выходные параметры процесса резания. Если деформационное поведение материала на макроуровне можно описать на основе кривых «напряжение-деформация», определяя значения предела прочности σ_B и предела текучести σ_T , то исследование эволюции дефектной структуры на микроуровне в зоне стружкообразования и вторичной дефор-

магии представляет определённую сложность и обуславливает необходимость применения тонких методов металлографических исследований.

В фундаментальных работах [1; 2] на основе механики процесса резания показано, что формирование поверхностного слоя при резании связано с системой сил на передней поверхности, действующих на зону стружкообразования, создавая у режущего лезвия определённое напряжённо-деформированное состояние, вызывая при этом сдвиг элемента стружки.

На рис. 1 представлены структуры стали 20, полученные на оптическом и электронном микроскопах.

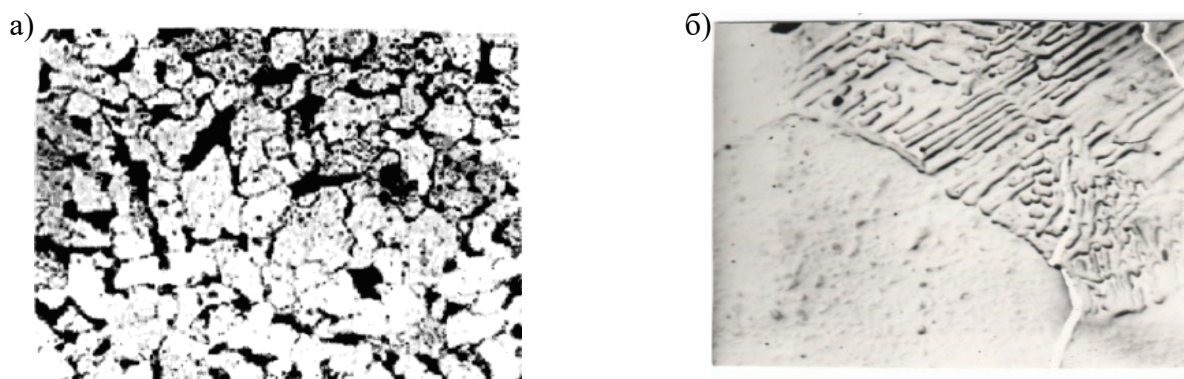


Рис. 1. Микрофотографии структуры стали 20: а – исходная микроструктура (x300); б – исходная микроструктура (x3000)

В углеродистых сталях [9–12] размеры цементита находятся в диапазоне 5...15 нм, а средний размер феррита составляет порядка 13...15 мкм (по ГОСТ 5639-82). На рис. 1 видно, что размеры феррита существенно больше, чем зёрен Fe_3C , образующих колонии в перлите.

В аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т (см. рис. 2), размер зёрен аустенита [11] достигает 300 мкм, а размеры упрочняющих частиц (нитридов, карбидов легирующих элементов) – нескольких нанометров.

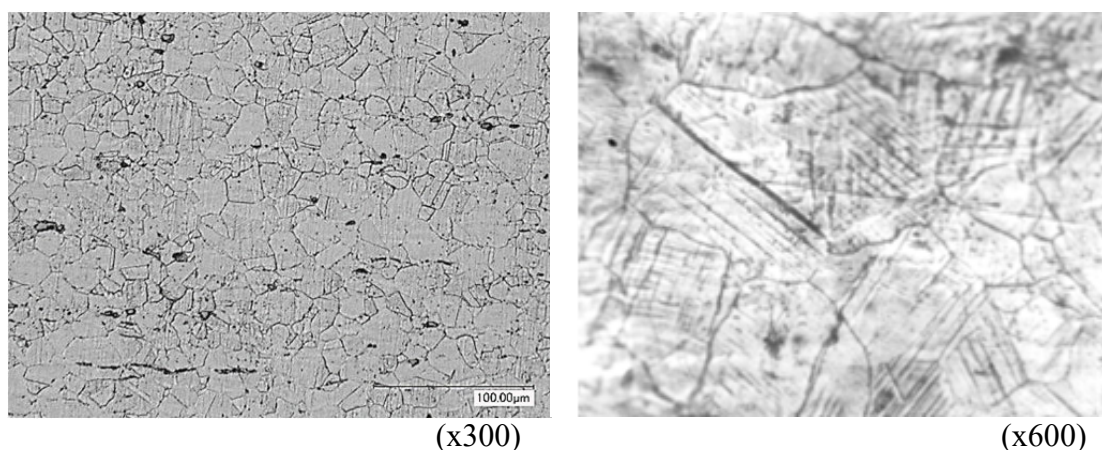


Рис. 2. Микрофотографии структуры нержавеющей стали 12Х18Н10Т

В алюминиевых сплавах [12] средний размер зёрен чистого алюминия достигает 1200 мкм, а упрочняющей фазы – нескольких нанометров. Поэтому параметры R_a и R_z , как будет показано ниже, по размерам больше упрочняющих фаз (частиц) в феррите и аустените. В этой связи твёрдые упрочняющие фазы не могут определять высоту неровностей поверхностного слоя.

Как показывают исследования, шероховатость поверхностного слоя определяют особенности пластической деформации основной фазы, в частности структурных основных составляющих

сталей – феррита и аустенита – в зоне стружкообразования. При этом известно [6], что пластические свойства аустенита выше, чем феррита, в частности, по параметру относительного удлинения (δ , %). Поэтому процесс резания аустенитной нержавеющей стали сопровождается сильным деформационным упрочнением, высокой адгезией с инструментальным материалом и затормаживанием стружки в зоне вторичной деформации. При этом шероховатость обработанной поверхности оказывается высокой.

Таким образом, структура металлов – это очень сложная динамическая система, прочность которой в значительной степени определяется размером зёрен упрочняющих частиц и их распределением в матрице основной структурной фазы, например, в углеродистых сталях это α -феррит.

На рис. 3 показана схема процесса резания углеродистой стали с учётом её структуры (см. рис. 1).

Высокие степени деформации в зоне стружкообразования обуславливают фрагментацию зёрен феррита (на рис. 3, зерна α -Fe заштрихованы в виде сетки). При перемещении стружки по передней поверхности из-за вторичной деформации в приконтактных слоях стружки формируется текстура. В результате зёрна феррита и колонии цементита (см. рис. 4) вытягиваются, т. е. обе эти структурные фазы интенсивно деформируются.



1 – фрагментация зёрен; 2 – микротрещины, формирующие неровности поверхности
Рис. 3. Схема, иллюстрирующая механизм образования неровностей на обработанной поверхности при резании углеродистой стали



Рис. 4. Микрофотография шлифа корня стружки при резании стали 20 (x300)

Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, как известно [1], определяется уровнем удельных контактных нагрузок на передней поверхности инструмента и адгезионными свойствами обрабатываемого и инструментального материалов. Степень деформации (относительный сдвиг) здесь может достигать [1] высоких значений (до 40), что более чем в 20 раз превышает деформацию основной массы стружки. Это в значительной степени может быть связано с пластическими свойствами обрабатываемых материалов, которые, например в углеродистых сталях, определяет содержание в них феррита. Поэтому имеется связь относительного удлинения (δ , %) с длиной контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента (см. рис. 5).

Однако при резании исходная структура металлов, как показано выше, подвергается большим пластическим деформациям, и в литературе [1–8] нет объяснения причин столь высоких значений относительного сдвига в приконтактных слоях стружки.

Можно предположить, что это связано с особенностями формирования здесь дислокационной структуры в металлах, в частности с её фрагментацией, что обеспечивает ей возможность достигать столь высоких степеней деформации в приконтактных слоях стружки.

На рис. 6 представлены микрофотографии дислокационной структуры в зоне стружкообразования, полученные с использованием микроскопии тонких фольг.

Из рис. 6 следует, что на верхней границе (см. рис. 4) зоны стружкообразования плотность дислокаций достигает $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 7 представлена микрофотография дислокационной структуры на приконтактной поверхности стружки. Как видно, в отличие от рис. 6, дислокационная структура здесь не выявляется, зёрна металла вытянуты в направлении высоких сдвиговых деформаций.

Можно полагать, что при столь высокой (см. рис. 6, $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$) плотности дислокаций локальные объёмы стружки находятся в аморфном состоянии (см. рис. 7), т. к. кристаллическая структура не выявляется. Например, в работах [15–17] отмечается, что высоким степеням деформации металлов свойственны фрагментация структуры, т. е. образование высокоугловых границ зёрен, аморфизация и фазовые изменения. Поэтому в результате указанных явлений в приконтактных слоях стружки в процессе резания реализуются структурные и фазовые превращения [5].

Выявленная связь длины контакта стружки с пластичностью материалов (см. рис. 5) позволяет утверждать, что длина контакта, в частности длина $C_{пл}$ пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента, влияет на формирование поверхностного слоя заготовки. Её влияние связано как с формированием на ней нароста, так и с высокими удельными нормальными давлениями вблизи режущего лезвия [1].

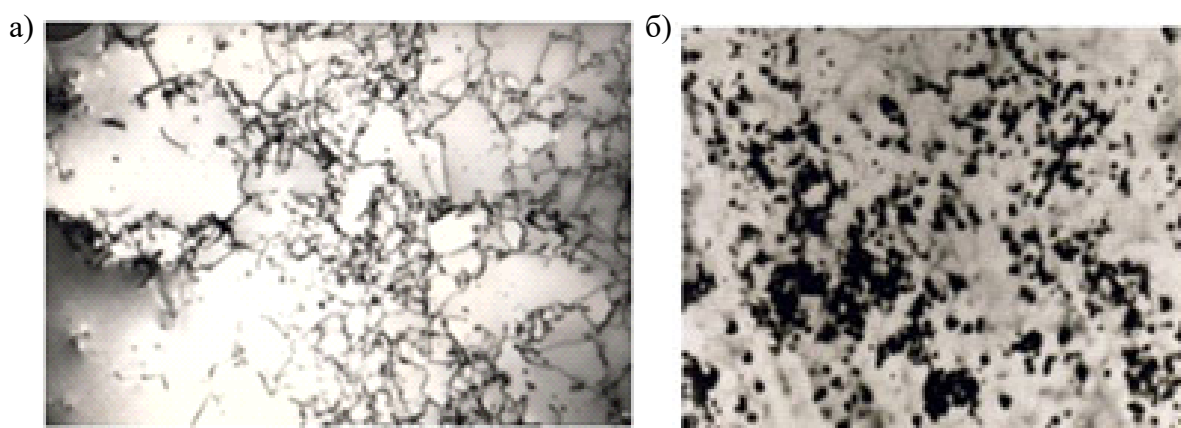


Рис. 6. Микрофотографии дислокационной структуры стали 20 вблизи ($\times 15\,000$) нижней границы стружкообразования $\rho = 10^6 \text{ см}^{-2}$ (а), верхней границы стружкообразования $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (б)

На рис. 8 и 9 представлены результаты экспериментальных исследований шероховатости (R_a) обработанной поверхности при резании стали 45 и У8 от скорости резания.

Исследования проводились на токарном станке 1К62, в качестве обрабатываемого материала применялись заготовки из стали 45 и У8 диаметром 80 мм, длиной 500 мм. В качестве инструмента использовался токарный проходной резец со сменной четырёхгранной пластиной толщиной 4 мм из твёрдого сплава Т15К6 с механическим креплением ($\alpha = 5^\circ$, $\gamma = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$). Шероховатость поверхности измерялась на профилемере мод. 170622.



Рис. 5. Зависимость длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента от относительного удлинения δ обрабатываемых металлов

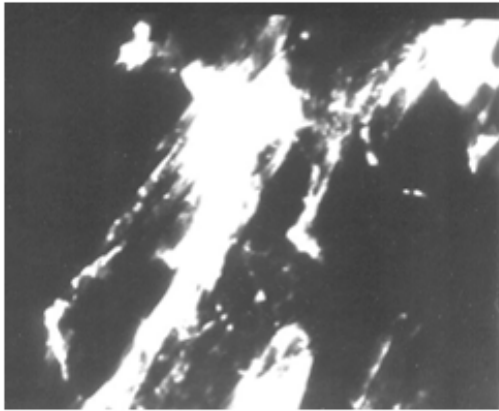


Рис. 7. Микрофотографии дислокационной структуры в приконтактном слое стружки при резании стали 20

Скорость резания изменялась в диапазоне: $V = 12,56 \dots 314$ м/мин. Подача принималась: $S = 0,11 \dots 0,21$ мм/об. Глубина резания $t = 0,5 \dots 1$ мм.

Зависимость R_a от скорости резания имеет экстремум при $V = 38$ м/мин. Согласно нашим исследованиям и литературным данным [1; 2], это связано с наростообразованием. Нарост берёт на себя функции режущего лезвия и увеличивает передний угол режущей части инструмента. Однако его периодический срыв приводит к увеличению значений R_a . С дальнейшим ростом скорости резания величина R_a уменьшается.

На рис. 9 представлена зависимость R_a от скорости при резании стали У8.

При резании стали У8 зависимость R_a от скорости имеет несколько другой характер. В частности, параметр R_a , во-первых, меньше, чем при резании стали 45.

Кроме того, влияние наростообразования на R_a проявля-

ется в меньшей степени. Это обусловлено тем, что сталь У8 менее пластична, чем сталь 45. В результате параметр R_a при резании этой стали меньше.

Сравнение значений R_a (см. рис. 8) при резании стали 45 со структурными элементами этой стали в исходном состоянии показывает, что R_a при резании на средних скоростях ($V = 20 \dots 50$ м/мин) больше, чем размер зёрен карбида железа, но соизмерим с размером зерна основной структурной фазы α -феррита в исходном состоянии. Однако при резании этой стали на высоких скоростях размер R_a меньше, чем размер зёрен феррита в исходном состоянии сталей.



Рис. 8. Зависимость R_a шероховатости от скорости резания для стали 45. $S = 0,11$ мм/об.

На наш взгляд, это обусловлено фрагментацией зёрен феррита (см. рис. 1 и б) при их деформации в зоне стружкообразования и последующем частичном разрушении по границам фрагментов (размер фрагмента – несколько нанометров) в результате исчерпания пластичности при формировании поверхностного слоя (см. рис. 1).

Поскольку формирование поверхностного слоя заготовки при резании происходит в условиях высоких степеней и скоростей деформации, то влияние вторичных механических свойств обрабатываемого металла в результате интенсивной деформации и фрагментации основных структурных элементов оказывается определяющим при рассмотрении влияния их на параметры, характеризующие качество поверхностного слоя, т. е. на значения R_a и R_z .



Рис. 9. Зависимость шероховатости R_a от скорости резания для стали У8. $S = 0,11$ мм/об.

Таким образом, контактные процессы, протекающие на передней поверхности инструмента, формируют, как отмечалось выше [1], на ней систему сил, которые передаются на зону стружкообразования, определяя структурные изменения в зоне стружкообразования, в частности, фрагментацию дислокационной структуры (см. рис. 3 и 6), влияющую на величину $\tau_{сдв}$ сопротивления сдвигу при резании и формирование R_a поверхностного слоя (см. рис. 8 и 9) заготовки.

Управление качеством поверхностного слоя при резании обеспечивается за счёт нейронно-сетевого моделирования [1]. На рис. 10 представлена нейронная сеть, где на вход устанавливаются выявленные основные параметры, определяющие шероховатость обработанной поверхности. Это режимы обработки, свойства инструментального и обрабатываемого материала, а также K_a усадка стружки, которая косвенно характеризует степень деформации срезаемого слоя и важный показатель структуры металла – относительное удлинение δ , определяющее развитие контактных процессов при резании.

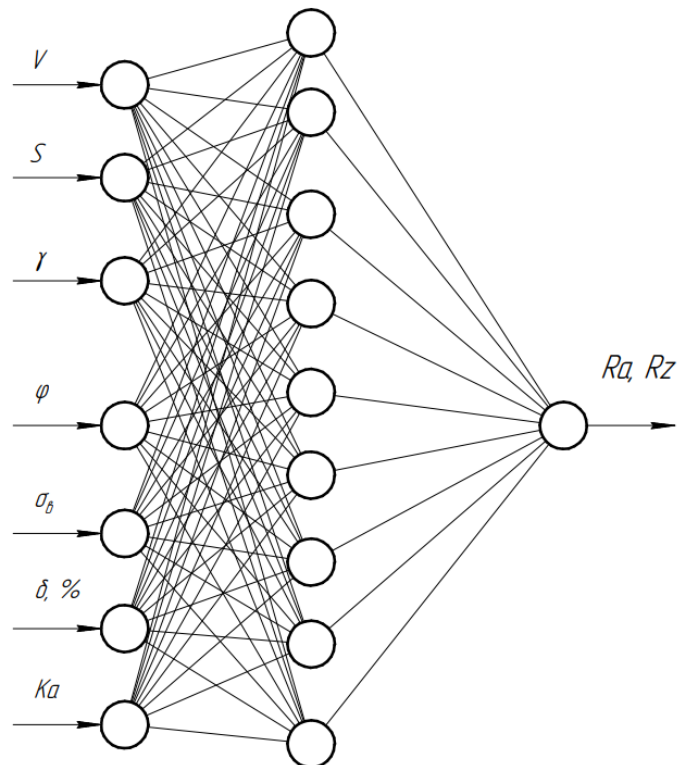


Рис. 10. Нейронная сеть для управления шероховатостью обработанной поверхности R_a и R_z

Разработанная нейронная сеть (см. рис. 10), выполняющая роль цифрового двойника, позволяет прогнозировать значения параметра R_a в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала, его структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорев, Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1956. – 367 с.
2. Исаев, А. И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А. И. Исаев. – М.: Машгиз, 1950. – 215 с.
3. Бобров, В. Ф. Особенности образования суставчатой и элементной стружек при высокой скорости резания / В. Ф. Бобров, А. И. Сидельников // Вестник машиностроения. – 1976. – № 7. – С. 61-66.
4. Подураев, В. Н. Обработка резанием жаропрочных и нержавеющей материалов / В. Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1965. – 518 с.
5. Кабалдин, Ю. Г. Исследование процессов деформации и разрушения срезаемого слоя при резании на основе атомного подхода к процессу резания / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Кузьмишина // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 5. – С. 31-40.
6. Розенберг, А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, Ю. А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
7. Вейц, В. Л. Математическое моделирование процесса стружкообразования при лезвийной обработке / В. Л. Вейц, В. В. Максаров, Е. Б. Козлова // Машиностроение и автоматизация производства: межвуз. сб. Вып. 14. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 139-145.
8. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н. И. Резников, Г. В. Бурмистров, И. Г. Жарков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
9. Цементит в углеродистых сталях: коллектив. моногр. / под ред. В. М. Счастливецова. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 380 с.
10. Халикова, Г. Р. Структура и механические свойства стали 09Г2С в кольцевой заготовке, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем / Г. Р. Халикова, Д. Н. Шерматов, Е. А. Наумкин // Материаловедение и защита от коррозии. – 2020. – Т. 18. – № 5. – С. 104-113.
11. Ганеев, А. В. Особенности формирования сегрегаций и карбидов железа на границах зёрен и механизмы упрочнения в ультрамелкозернистых углеродистых сталях, полученных интенсивной пластической деформацией кручением: автореф. ... канд. физико-математических наук: 05.16.08 / Ганеев Артур Вилевич. – Уфа, 2019. – 20 с.
12. Влияние размеров вводимых в расплав частиц на измельчение зерна в конечной структуре алюминиевых сплавов / И. А. Жуков, А. И. Потеев, А. Б. Ворожцов, А. Е. Матвеев, О. Б. Кудряшова // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 79-86.
13. Гольштейн, М. И. Металлофизика высокопрочных сплавов / М. И. Гольштейн, В. С. Литвина, Б. М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
14. Павлов, В. А. Аморфизация структуры металлов и сплавов с предельно высокой степенью пластической деформации / В. А. Павлов // ФММ. – 1985. – Т. 59. – Вып. 4. – С. 629-649.
15. Бриджмен, П. У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва / П. У. Бриджмен. – М.: ЛИБРОКОМ, 2010. – 444 с.
16. Метлов, Л. С. Неравновесная эволюционная термодинамика и ее приложения / Л. С. Метлов. – Донецк: Ноуледж, 2014. – 176 с.
17. Основы пластической деформации наноструктурных материалов / Э. В. Козлов, А. М. Глезер, Н. А. Конева и др. – М.: Физматлит, 2016. – 360 с.
18. Кабалдин, Ю. Г. Управление киберфизическими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / Ю. Г. Кабалдин, Д. А. Шатагин, П. В. Колчин; под ред. Ю. Г. Кабалдина. – М.: Иновационное машиностроение, 2019. – 293 с.